管道参数对液/固两相流弯管流场及冲蚀影响分析

彭文山 曹学文

中国石油大学 (华东) 储运与建筑工程学院 青岛 266580

摘要：采用计算流体动力学 (CFD) 方法分析不同管道参数包括管道直径、弯径比、弯曲角度条件下含砂液/固两相流管道的冲蚀规律，并结合颗粒碰撞模型分析了砂粒对于管壁的冲蚀作用。结果表明：不同管道参数变化影响冲蚀速率的效果是不同的，其中改变管径的影响最大、弯径比次之、弯管角度的影响最小；弯管冲蚀最严重区域有弯头侧壁及下游直管段与弯头连接处外侧，冲蚀最严重区域并不是确定的，随着弯管参数的改变，冲蚀最严重区域会发生移动。

关键词：液/固两相流 弯管直径 弯径比 弯曲角度 颗粒轨迹 Stokes数

中图分类号：TE832 **文献标识码：**A **文章编号：**1005-4537(2016)01-0087-10

Influence of Pipe Parameters on Flow Field of Liquid-solid Two-phase Flow and Erosion of Pipe Bend

PENG Wenshan, CAO Xuewen

College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: The influence of pipebend parameters on flow field of liquid-solid two-phase flow and the erosion of pipes was studied by means of computational fluid dynamics (CFD). The relation of the erosion of pipe with the variation of the diameter, curvature-to-diameter ratio and bending angle of the pipe, as well as the particles induced erosion of the pipe wall were mainly concerned. The results show that: (1) the erosion rate varies with the varying pipeline parameters, among them the diameter is the main factor, the curvature-to-diameter ratio the next, and the bending angle the last; (2) the areas of serious erosion mainly exist in the side walls of joints as well as the outside of the joints between export of straight pipe and elbow. However, the location of the most serious erosion is uncertain, which will change along with the variation of the bend pipe parameters.

Key words: liquid-solid two-phase, pipe bend diameter, curvature-to-diameter ratio, bending angle, trajectory, Stokes number

1 前言

冲刷腐蚀在石油、化工、水电等工业过程中广泛存在，暴露在运动流体中的所有类型的设备，都会遭受到冲刷腐蚀的破坏[1]，在含固相颗粒的两相流中，破坏更为严重，它将大大缩短设备的寿命。管道冲蚀是一个十分复杂的过程，它与管道流量、管道几何构造、管壁材料、流体性质、输砂率、砂粒形状、砂粒粒径等诸多因素均有关系[2]。在油气田开发过程中，随着开采时间的延长，油井出砂量增加，原油中含水量也大大增加，在油气生产过程中，虽然经过过滤，颗粒物仍会存在于油气中，砂粒随液体一起流动，出现严重的砂磨管道内壁现象，油气集输是一个连续的过程，固体砂粒对管道的冲刷将持续进行，直

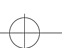
定稿日期：2015-02-05

基金项目：国家自然科学基金项目 (51274232) 和中央高校基本科研业务费专项资金项目 (15CX06070A) 资助

作者简介：彭文山，男，1987年生，博士生

通讯作者：曹学文，E-mail: caoxw@upc.edu.cn，研究方向为天然气处理与加工、油气水多相流理论及应用、海底管道完整性管理

DOI: 10.11902/1005.4537.2014.268



至出现管底破损。砂粒经过长时间碰撞管道内壁、弯头、阀门等管道部件，最终对管道系统造成侵蚀破坏，进而造成危险事故[3]，导致巨大的经济损失。

国内外对于弯管冲刷腐蚀的研究主要集中在弯管参数变化对于管内流场变化的影响[4,5]、弯管内部颗粒流动轨迹的描述[6,7]以及冲刷腐蚀预测[8-11]等方面，在弯管冲刷腐蚀实验方面，虽然管流模拟实验可以很好地模拟实际管道设备的工况条件，易于测量和控制流体的流动，流体中固体颗粒分布也比较均匀，但是这种实验方法需要的溶液量大，实验费用较高，操作也比较复杂，因此国内仅有极少数学者使用管流冲刷实验对弯管冲蚀进行研究[12,13]，国外部分学者利用管流实验进行了相关研究[14,15]，研究主要集中在冲刷与腐蚀交互作用、管内流动变化等方面。鉴于实际弯管冲蚀实验在操作上以及经济高效上的诸多不便，采用合理高效的数值模拟方法得到弯管冲蚀相关结果来指导工程显得尤为重要。国内对于综合考虑弯管参数变化导致管内流场、颗粒碰撞以及颗粒与流体相互作用变化而导致弯管冲蚀的机理研究不足，对于影响冲蚀程度的相关表征参数也鲜有研究。本文在Eulerian坐标系下求解连续相的运动方程，Lagrangian坐标系下应用离散颗粒模型求解颗粒-流体、颗粒-壁面之间的相互作用，通过对固体颗粒运动轨迹的跟踪，利用磨损方程完成冲蚀问题的预测和磨损量的计算，分析不同管道参数下管道内部流体以及颗粒的运动规律得到管壁冲蚀机理，为油气田开发过程中冲蚀防护及弯管优化提供参考。

2 计算方程

2.1 连续相流动方程

流体相的动力学用两相流动N-S方程描述。考虑流体-颗粒相间阻力的影响，连续相具有三维、不可压和湍流的特征，控制方程包括连续方程、动量方程及k-ε湍流模型。鉴于管道内流体属于高Reynolds数流动，数值模拟采用标准k-ε湍流模型。

(1) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla(\rho \vec{u})=0 \tag{1}$$

式中，t为时间，s；ρ为连续相密度，kg/m^3；$\vec{u}$为连续相瞬时速度矢量，m/s。

(2) 动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u})+\nabla\cdot(\rho \vec{u}\vec{u})=-\nabla p+\nabla\cdot\left\{\mu[(\nabla \vec{u}+\nabla \vec{u}^{\mathrm{T}})-\frac{2}{3}\nabla\cdot\vec{u}I]\right\}+\rho\vec{g}+\vec{F} \tag{2}$$

式中，p为流体内压力，Pa；μ为粘度，Pa·s；I为单位张量；$\vec{g}$为重力加速度，m/s^2；$\vec{F}$为体积力，N。

(3) 湍流方程

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\dfrac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\dfrac{\partial}{\partial x_j}[(\mu+\dfrac{\mu_t}{\sigma_k})\dfrac{\partial k}{\partial x_j}]+G_k-\rho\varepsilon+S_k \\ \dfrac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\dfrac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\dfrac{\partial}{\partial x_j}[(\mu+\dfrac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon})\dfrac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}]+C_{1\varepsilon}\dfrac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\dfrac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon\end{cases} \tag{3}$$

其中

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

式中，k为湍流动能，J；μ_t为湍动粘度，Pa·s；G_k为由于平均速度梯度引起的湍动能k的产生项；ε为湍流耗散率；x_i和x_j为空间坐标，下标i, j=1，2，3，代表x，y，z坐标轴，i≠j；σ_k为k方程的湍流Prandtl数，取1.0；σ_ε为ε方程的湍流Prandtl数，取1.3；S_k，S_ε为自定义参数，无因次；$C_{1\varepsilon}$=1.44，$C_{2\varepsilon}$=1.92，C_μ=0.09为经验常数。

2.2 离散相控制方程

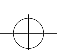
采用Lagrangian方程对颗粒轨迹进行求解，固体颗粒的受力方程为：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}u_\mathrm{p}}{\mathrm{d}t}=F_\mathrm{D}(u-u_\mathrm{p})+\dfrac{g_y(\rho_\mathrm{p}-\rho)}{\rho_\mathrm{p}}+F_y \\ F_\mathrm{D}=\dfrac{18\mu}{\rho_\mathrm{p}d_\mathrm{p}^2}\dfrac{C_\mathrm{D}\mathrm{Re}_\mathrm{p}}{24} \\ \mathrm{Re}_\mathrm{p}=\dfrac{\rho d_\mathrm{p}|u-u_\mathrm{p}|}{\mu} \\ C_\mathrm{D}=a_1+\dfrac{a_2}{\mathrm{Re}_\mathrm{p}}+\dfrac{a_3}{\mathrm{Re}_\mathrm{p}^2}\end{cases} \tag{5}$$

式中，u_p为沙粒速度；ρ_p为沙粒密度；d_p为沙粒直径；Re_p为相对Reynolds数；g_y为y方向重力加速度，为−9.81 m/s^2；C_D为曳力系数；F_y为y方向的其他作用力：包括虚拟质量力、压力梯度力、布朗力和Saffman升力；对于球形颗粒，在一定Reynolds数范围内，a_1，a_2和a_3是常数，具体取值参考文献[16]。

2.3 冲刷腐蚀模型

影响弯管液/固两相流冲刷腐蚀的因素很多，主要包括流体力学因素、材料因素、固相颗粒因素以及液相因素等[17]，本文弯管冲蚀涉及的主要影响因素有颗粒速度、颗粒流量、颗粒尺寸、冲刷角度、弯管材料以及弯管直径等因素，其中固体颗粒碰撞特性对冲蚀影响较为重要，鉴于Huser和Kvernvold[18]提出的颗粒碰撞角度函数被计算流体动力学 (CFD) 模型和众多冲蚀经验模型所使用，本文将此模型应用



到数值模拟软件中完成冲蚀计算：

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{n=1}^{N} \frac{m_{\text{p}} C(d_{\text{p}}) f(\theta) u_{\text{p}}^{b(v)}}{A_{\text{face}}} \quad (6)$$

式中，R_{erosion}为壁面磨损速率，kg/(m^2·s)；N为碰撞颗粒数目；m_p为颗粒质量流量，kg/s；$C(d_p)$为颗粒直径的函数；θ为颗粒对壁面的侵入角，(°)；$f(\theta)$为侵入角的函数；$b(v)$是此相对速度的函数，取2.6；A_{face}为壁面计算单元的面积，m^2。

$$f(\theta) = 2.69\theta + 1.61\theta^2 - 8.84\theta^3 + 7.33\theta^4 - 1.85\theta^5 \quad (7)$$

$$C(d_{\text{p}}) = 1.8 \times 10^{-9} \quad (8)$$

2.4 壁面碰撞恢复方程

固体颗粒与壁面发生碰撞时存在能量转移和能量损失，主要表现在碰撞前后速度分量的变化[19]。通常以碰撞前后速度分量的比值衡量能量的损失情况，并将该比值定义为恢复系数。比较常用的包括Forder等[20]提出的Non-stochastic恢复系数以及Grant等[21]提出的Stochastic恢复系数。本文采用在计算中较为常用的Grant和Tabakoff恢复系数，方程形式为：

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{N}} = 0.993 - 1.76\theta + 1.56\theta^2 - 0.49\theta^3 \\ \varepsilon_{\text{T}} = 0.988 - 1.66\theta + 2.11\theta^2 - 0.67\theta^3 \end{cases} \quad (9)$$

式中，T和N分别代表切向和法向方向。

3 冲蚀数值模型

3.1 管道参数

模型由3部分组成，分别是进口段L1、弯管段和出口段L2。弯管最小管径D=40 mm，为了使管内流动充分发展，上下游管路长度均取为18D，初始弯径比R/D=1.5。室温条件下，以水作为连续相介质，入口速度为10 m/s，从水平直管入口流入，从竖直向上直管流出，离散相砂粒密度为2650 kg/m^3，粒径200 μm，砂粒的质量流速为0.2 kg/s，重力方向沿y轴负方向。

3.2 边界条件及数值算法

流体相：流体计算采用标准k-ε湍流模型，近壁区域采用标准壁面函数处理。入口采用速度进口边界条件，出口为自由出流边界。管壁为壁面边界，壁面粗糙度常数设为0.5。速度入口采用“边界法向”方式；湍流描述中“湍流强度”设为5%；并设定壁面边界为“静止壁面”和“无滑移壁面”。

离散相：DPM模型中进口和出口处采用逃逸(Escape)条件，壁面采用反弹(Reflect)条件，假设入射的粒子是相互独立，均匀的球形，忽略颗粒之间相互碰撞导致的结合与破碎。需特别说明的是固体颗粒作无旋运动，忽略颗粒与颗粒之间的碰撞[19]，颗粒轨迹采用Lagrangian方程进行求解。由于流场中固体颗粒的浓度较小，连续相的流体速度较大，连续相和离散相之间具有较大的密度差，因此固体颗粒受到的虚拟质量力、流场的压力梯度引发的压力梯度力和Saffman升力等作用力一并不予考虑[22]。

动量、湍动能的离散均采用二阶迎风格式，固体颗粒采用DPM模型，压力速度耦合采用SIMPLE算法。离散相采用双向耦合计算，计算开始前打开离散相模型加入离散相粒子，初始化流场，设置相间耦合、每5步连续相后进行离散相轨道计算，然后将更新后的离散相动量与能量加入下一步的连续相方程计算中，收敛稳定后，进行离散相后处理或观察连续相流场情况。

3.3 网格划分及网格无关性验证

网格类型和尺寸涉及到计算精度和总体计算量的大小。进行网格无关性分析能够得到适合该问题的网格密度，保证数值模拟结果的精度。经初步计算，模型内部为湍流流动，研究[23]表明，在管道近壁处存在黏性底层，这层液体几乎处于层流状态，并不是管道内部所有区域都是紊流状态，为考虑黏性底层的影响，网格划分时，靠近管壁处设置边界层，提高计算精度，网格划分如图1。

以直径为40 mm的弯管为例，设定上下游长度均为18D，最大冲蚀速率及最大壁面切应力与网格关系曲线如图2。可知，在较少网格数目下，最大冲蚀速率随着网格数目的增多呈现波浪形不规则变化，而最大壁面切应力则随网格数目增加而缓慢增大，当网格数目达到960828后，最大冲蚀速率与最大壁面切应力均趋于稳定。因此，在计算量允许的前提下，为最大限度减少计算误差，选用网格数为960828的网格划分方法。

4 结果与讨论

4.1 管径变化对冲刷腐蚀的影响

由于最大冲蚀速率在工程安全生产中的特殊作用，分析管道直径变化与最大冲蚀速率之间的关系具有重要意义。弯径比为1.5时，弯管直径与冲蚀速率关系如图3。可知，随着弯管直径的增大，冲蚀速率急剧减小，冲蚀速率由管径40 mm时的6.537×10^{-6} kg/(m^2·s)减小到管径400 mm时的0.0971×10^{-6} kg/(m^2·s)，相差两个数量级，可见管径变化对于冲蚀速率影响显著。当管径超过400 mm时，

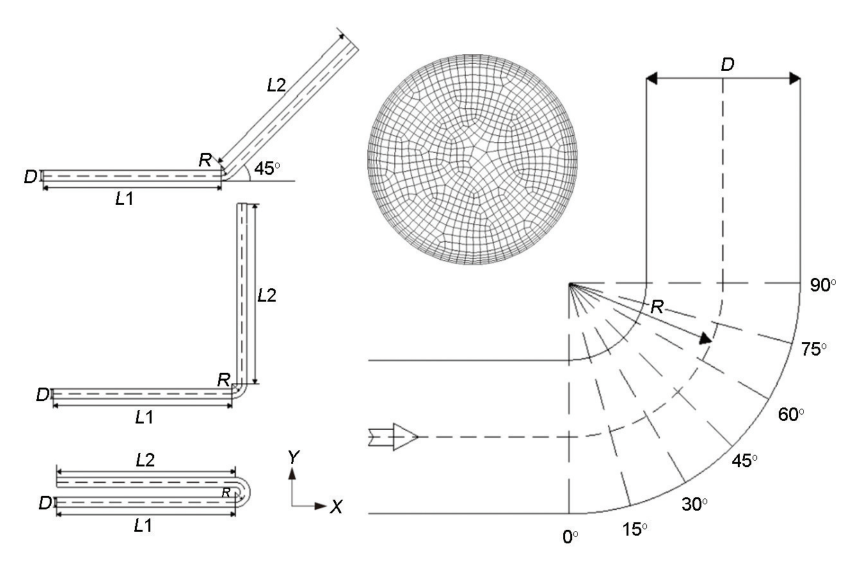


图1 弯管计算区域几何模型及网格划分

Fig.1 Geometry of pipe bend and grid division

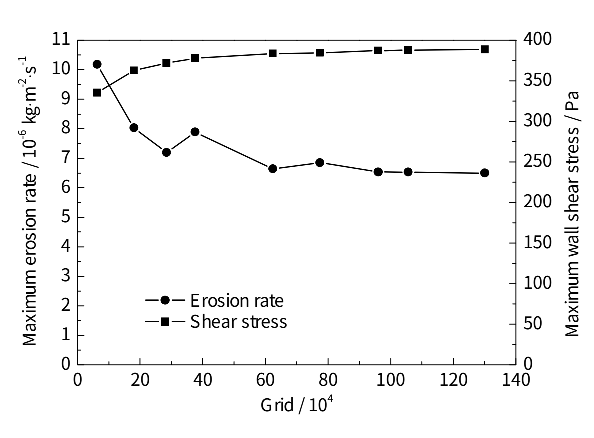


图2 最大冲蚀速率及壁面切应力与网格关系曲线

Fig.2 Erosion rate and wall shear stress *vs* grid numbers

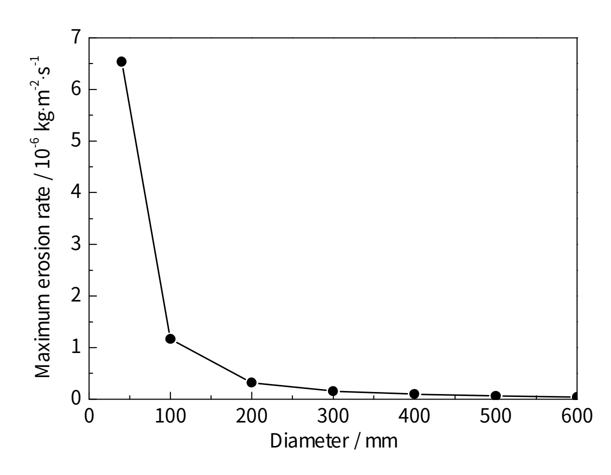


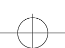
图3 弯管直径与冲蚀速率关系曲线

Fig.3 Pipe bend diameter *vs* erosion rate curve

随管径的增大，冲蚀速率增加缓慢。文献[24]从壁面切应力角度分析管径与冲蚀速率关系也说明了这一规律。产生上述现象的原因不仅与管道内部流场变化以及颗粒运动有关；而且还与管道的内表面积有关，大直径管道内壁面积更大，单位面积上受到颗粒碰撞次数减少，冲蚀速率减小。

数值计算结果表明，在管道弯头处冲蚀速率最大，最易破坏。为深入分析弯管冲蚀速率与管道内部流场之间的关系，选取弯头0°~90°共7个截面进行分析，不同直径弯管截面处流场分布见图4。可知，在同一管径下，随着截面角度的增大，管道内流速分布呈现出上半截面先增大后减小的趋势，在45°截面达到最大值；而下半截面流速先减小后增大，在45°截面时达到最小值。从管内流场矢量图可看出，从60°截面开始，管道内部开始产生较明显二次流，壁面开始产生由内壁两侧指向内壁顶部的流动，且范围越来越大；在不同管径下，各直径管道内流场分布趋势基本相同。但是管径越大，管道上截面最大速度所占的截面区域百分比越大，而二次流所占的截面区域百分比越小，说明管道内流速分布与二次流的分布有一定的对应关系。

不同管径下颗粒轨迹与冲蚀速率的关系见图5。可知，弯管冲蚀较严重的区域有两个：下游直管段与弯头连接处外侧以及弯头侧壁。管径较小时，下游直管段与弯头连接处外侧冲蚀最严重，而弯头侧壁冲蚀不显著，随着管径的增大，冲蚀最严重区域由下游直管段与弯头连接处外侧向弯头侧壁转移。产生上述现象的原因主要有：当其他参数固定时，管径较小，Stokes数较大，固体颗粒跟随性不好，颗粒粒径较大，惯性力占主导作用，颗粒沿来流方向与下游直管段和弯头连接处碰撞次数较多，加之管道下截面在弯头角度较大时流速较大，颗粒碰撞能增大，冲蚀速率增大。当管径增大时，Stokes数变小，颗粒



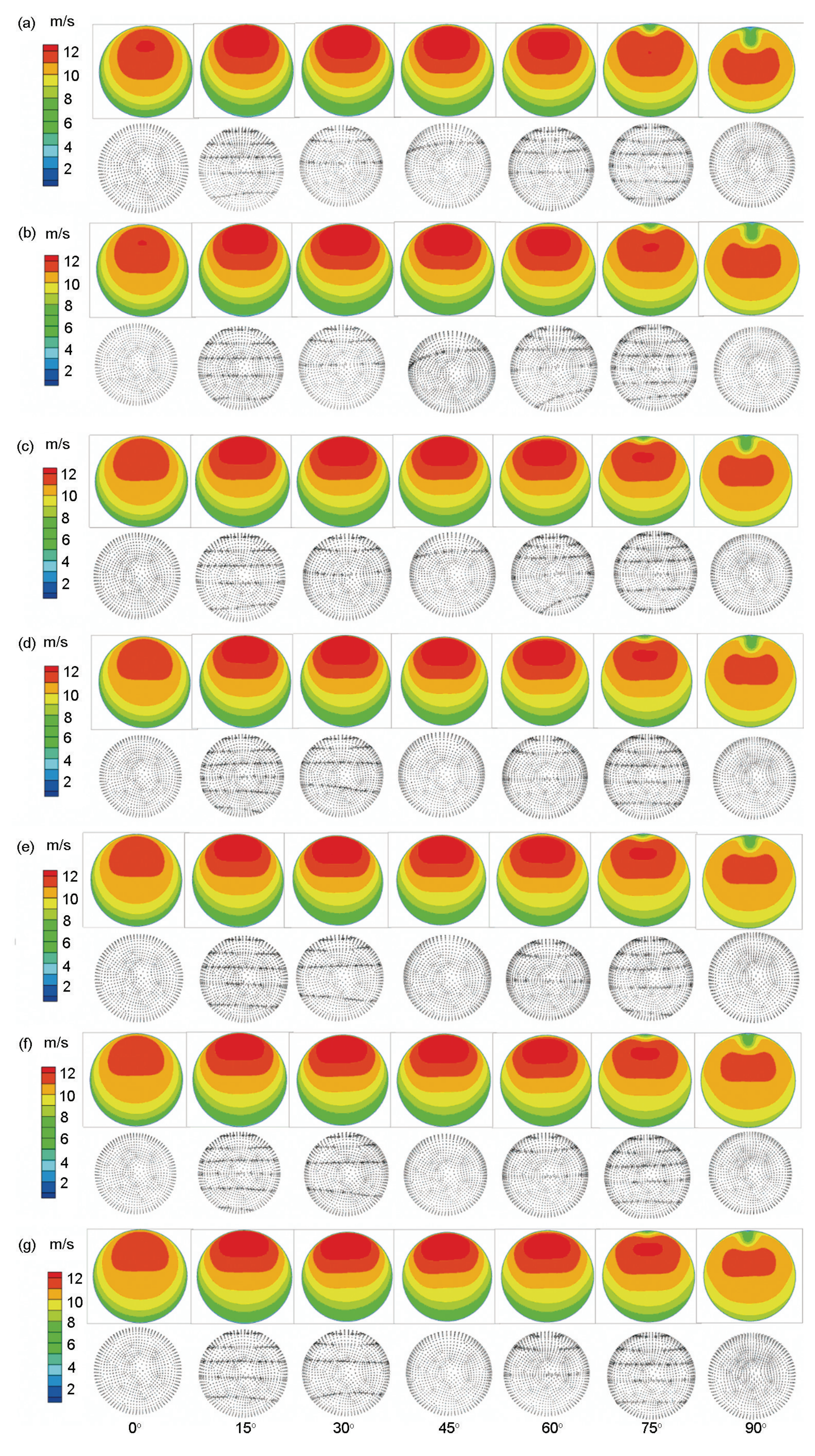


图4 不同直径弯管截面处流场分布图

Fig.4 Flow fields in the cross sections of pipe bends with different diameters: (a) 40 mm, (b) 100 mm, (c) 200 mm, (d) 300 mm, (e) 400 mm, (f) 500 mm, (g) 600 mm

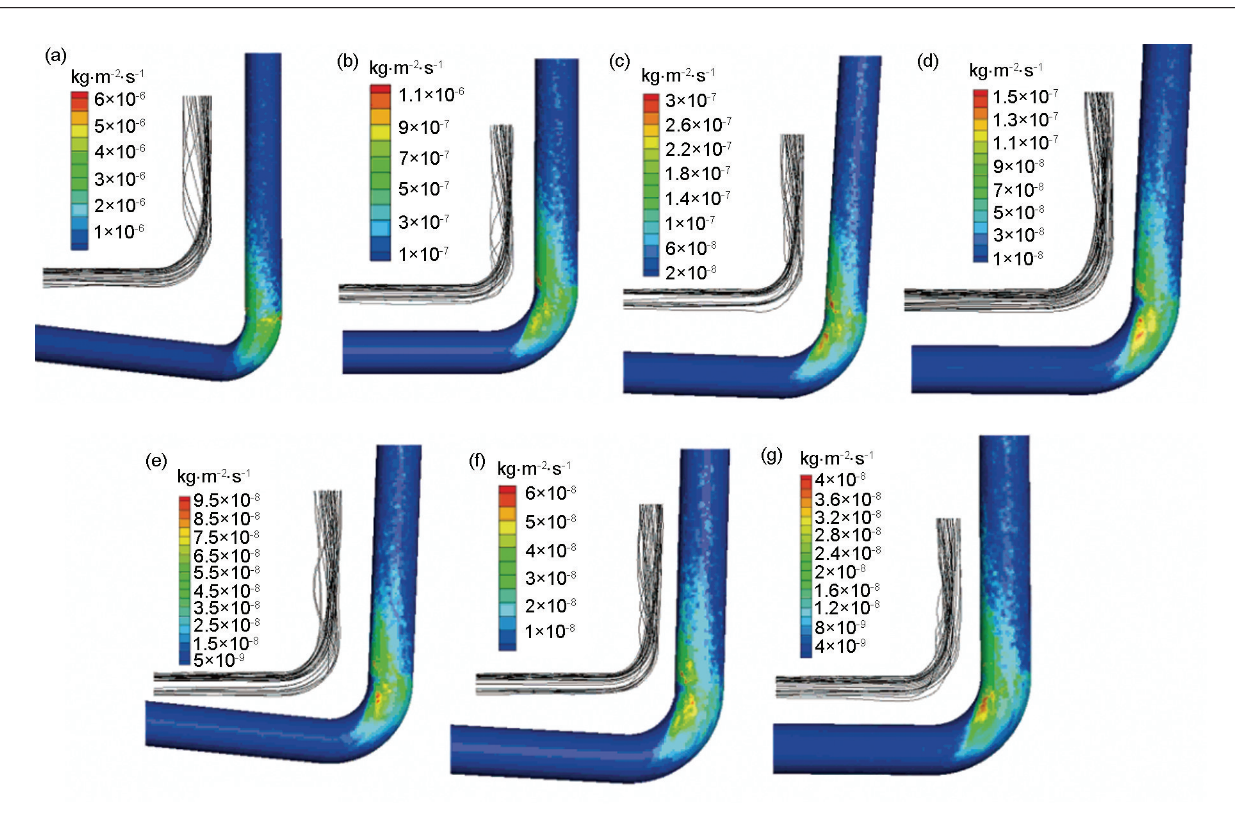


图5 不同管径下颗粒轨迹与冲蚀速率示意图

Fig.5 Changes of particle trajectory and erosion rate with the diameter of pipe bend: (a) 40 mm, (b) 100 mm, (c) 200 mm, (d) 300 mm, (e) 400 mm, (f) 500 mm, (g) 600 mm

跟随性良好，曳力占主导作用，随着弯头截面角度增大，二次流对颗粒影响明显，颗粒随二次流碰撞弯头侧壁，使得弯头侧壁冲蚀速率增大。

4.2 弯径比变化对冲刷腐蚀的影响

管径为100 mm时，管道弯径比与冲蚀速率关系见图6。可知，随着管道弯径比的增加，冲蚀速率逐渐减小，弯径比在1.5~4范围内冲蚀速率减小较快，弯径比大于4以后，冲蚀速率减小趋于平缓。文献[25]中也提出在同一管径下随着弯径比的增大，相对磨损量下降，但在弯径比大于4后随着弯径比的增大，磨损量下降趋势缓慢，在工程中有一个经济弯径比，范围是4~6。上述规律产生主要是由于随着弯径比增大，弯管路径变长，管内流动趋于平缓，固体颗粒对管壁冲击减弱，同时二次流动造成的磨损降低，因而冲蚀速率降低。

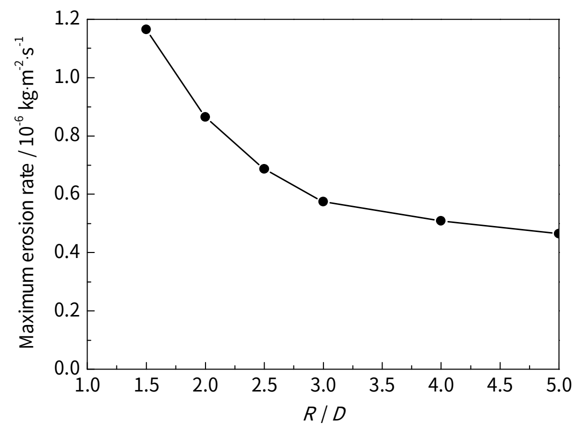


图6 管道弯径比与冲蚀速率关系曲线

Fig.6 Erosion rate *vs* curvature-to-diameter ratio curves

不同弯径比弯管截面处流场分布见图7。可知，在同一弯径比下，管内流速较大区域先增大，到30°~45°时达到最大，之后逐渐减小。另外，随着弯管截面角度的增加，逐渐出现二次流，角度越大，二次流越明显，范围越大。在不同弯径比条件下，随着弯径比的增加，管内流速较大的区域越来越集中于管道截面中心区域，在较小的截面角度范围内，流速在管内分布也随着弯径比的增大而越来越均匀。另外，随着弯径比的增大，二次流沿着来流方向出现的越早，即在较小截面角度下即可出现二次流，且随着截面角度的增加，二次流范围逐渐增大。

不同弯径比下颗粒轨迹与冲蚀速率的关系见图8。可知，弯管冲蚀严重区域主要集中在弯管侧壁，另外下游直管段与弯头连接处外侧也有部分冲蚀较严重。随着弯管弯径比的增大，弯头侧壁区域冲蚀逐渐减弱，当 R/D=5时，弯头侧壁处冲蚀已很小，而冲蚀较严重的区域转移到下游直管段与弯头连接处外侧。产生上述现象的原因主要是：(1) 弯径比较小

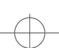
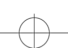


图7 不同弯径比弯管截面处流场分布图

Fig.7 Flow fields in the cross sections of pipe bends with different curvature-to-diameter ratios: (a) *R*/*D*=1.5, (b) *R*/*D*=2, (c) *R*/*D*=2.5, (d) *R*/*D*=3, (e) *R*/*D*=4, (f) *R*/*D*=5



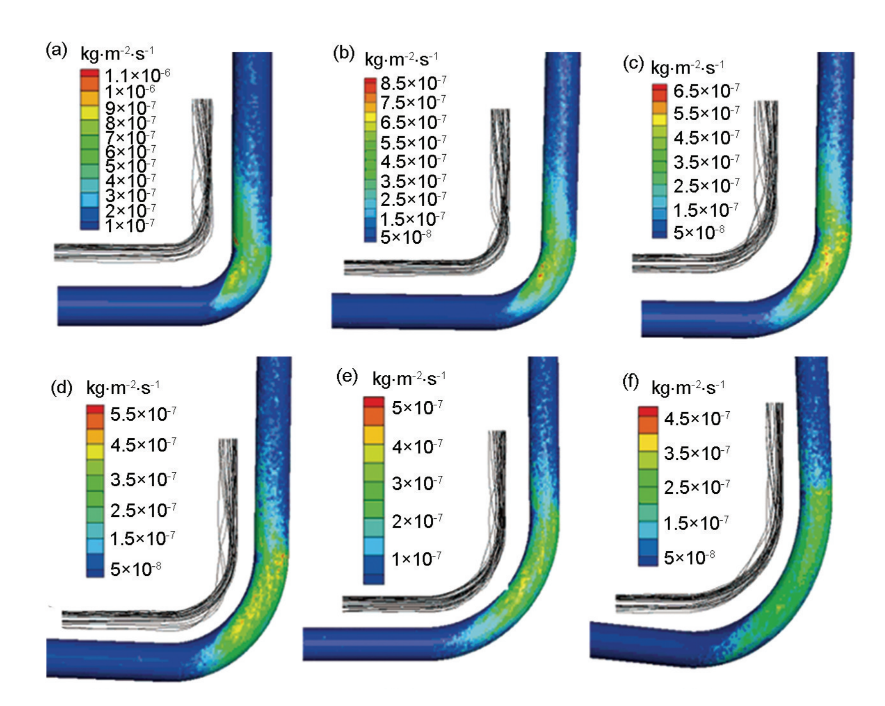


图8 不同弯径比下颗粒轨迹与冲蚀速率示意图

Fig.8 Changes of particle trajectory and erosion rate with the curvature-to-diameter ratio of pipe bend: (a) *R*/*D*=1.5, (b) *R*/*D*=2, (c) *R*/*D*=2.5, (d) *R*/*D*=3, (e) *R*/*D*=4, (f) *R*/*D*=5

时，弯头60°截面处开始出现二次流，且由于流速较大，二次流带动颗粒撞击弯头侧壁区域，使得冲蚀严重，而在沿主流方向上由于流速较大区域主要集中在管道上半截面，而下半截面流速较小，因此，颗粒对下游直管段与弯头连接处冲蚀并不严重；(2) 弯径比较大时，弯头在30°~45°截面范围内即形成二次流，且随截面角度增大，二次流范围增大，因此弯头侧壁冲蚀严重区域较大，但是由于流速较大区域从管道上半截面逐渐移至下半截面，因此弯头侧壁处冲蚀速率较小，反而下游直管段与弯头连接处由于流速较大，颗粒碰撞能增大，冲蚀速率变大。

4.3 弯曲角度变化对冲刷腐蚀的影响

为研究不同弯管类型对冲蚀速率的影响，对45°，90°和180° 3种工程中最常见的弯管进行了分析。管径为100 mm时，不同弯管类型与冲蚀速率关系见图9。可知，45°，90°和180°弯管的冲蚀速率逐渐增加，这主要是由于随着弯管弯曲角度增大，弯管内流场发生变化，导致固体颗粒与壁面碰撞不同产生的。

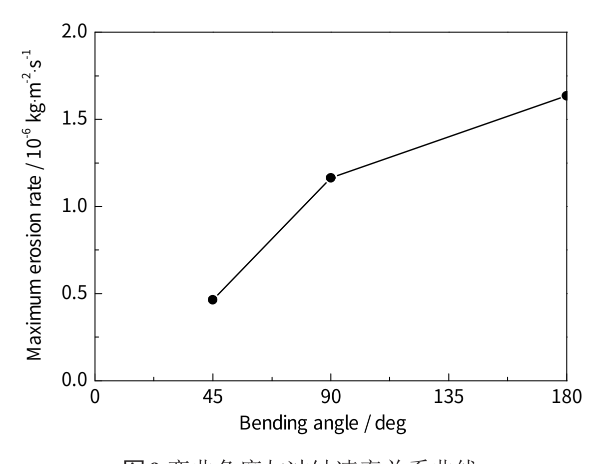


图9 弯曲角度与冲蚀速率关系曲线

Fig.9 Bending angles *vs* erosion rate curve

不同类型弯管截面处流场分布见图10。可知，3种不同角度的弯管截面处速度最大区域均为管道上半截面。随着弯曲角度的增大，弯头相同截面处的速度也越来越大，且出现最大流速的区域也随着弯曲角度的增大而变大。3种不同类型的弯管随着弯头截面角度的增加，二次流也越来越明显。

不同类型弯管颗粒轨迹与冲蚀速率的关系见图11。可知：3种不同弯曲角度弯管的最大冲蚀位置主要集中在弯头侧壁以及下游直管段与弯头连接处内侧区域。随着弯曲角度的增加，壁面冲蚀区域逐渐增大。产生上述现象的原因主要是：(1) 随着弯曲角度的增加，弯头不同截面处最大流速范围增大，使得颗粒碰撞能增加，在二次流影响下与管道弯头侧壁碰撞，导致冲蚀速率增加；(2) 随着弯曲角度的增加，弯管对颗粒流的流动约束增加，由颗粒的运动轨迹可知颗粒与弯头碰撞后反弹到弯头侧壁的概率增大，增加了颗粒与壁面的碰撞频率，加剧了冲蚀作用，而且使得冲蚀区域增大。

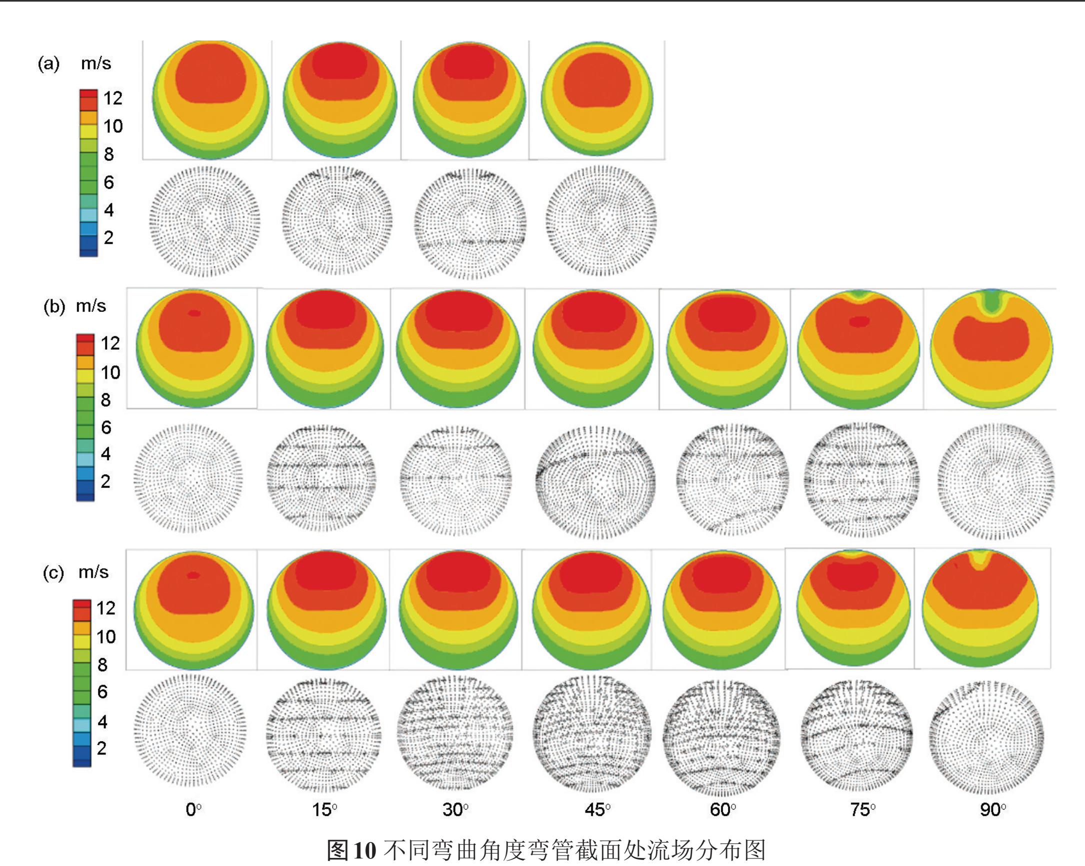


图 10 不同弯曲角度弯管截面处流场分布图

Fig.10 Flow fields in the cross sections of pipe bends with different bending angles: (a) 45°, (b) 90°, (c)180°

图 11 不同弯曲角度弯管颗粒轨迹与冲蚀速率关系示意图

Fig.11 Changes of particle trajectory and erosion rate with the bending angle of pipe bend: (a) 45°, (b) 90°, (c) 180°

5 结论

(1) 弯管参数对于弯管冲蚀影响严重的程度依次为：弯管直径＞弯管弯径比＞弯管弯曲角度；在实际工程中适当增加管径及弯径比，降低弯曲角度有利于减小冲蚀破坏。

(2) 弯管冲蚀最严重区域随着弯管参数变化是会发生转移的。随着管径的增加，冲蚀最严重部位由下游直管段与弯头连接处转移至弯头侧壁；而随着弯径比的增加，冲蚀最严重区域由弯头侧壁区域移动至下游直管段与弯头连接处外侧。另外，不同弯曲角度弯管冲蚀严重区域基本集中在弯头侧壁区域，但是随着弯曲角度的增加，冲蚀严重区域越来越大。

参考文献

[1] Dai Z, Shen S M, Ding G Q. Erosion-corrosion and protection of metals in fluids with solid particles [J]. Corros. Prot., 2007, 28(2): 86
(代真, 沈士明, 丁国铨. 金属在固液两相流体中的冲刷腐蚀及其防护 [J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(2): 86)

[2] Zhu J, Zhang Q B, Chen Y, et al. Progress of study on erosion-corrosion [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2014, 34(3): 199
(朱娟, 张乔斌, 陈宇等. 冲刷腐蚀的研究现状 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(3): 199)

[3] Wang S M, Liu H X, Zhang R, et al. Numerical simulations of sand erosion in pipelines and evaluations of solid particle erosion equations [J]. Ocean Eng., 2014, 32(1): 49
(王思邈, 刘海笑, 张日等. 海底管道沙粒侵蚀的数值模拟及侵蚀

公式评价 [J]. 海洋工程, 2014, 32(1): 49)

[4] Lian Z H, Chen X H, Lin T J, et al. Study on erosion mechanism of bending joint in blooey line [J]. J. Southwest Petrol. Univ. (Sci. Technol. Ed.), 2014, 36(1): 150
(练章华, 陈新海, 林铁军等. 排砂管线弯接头的冲蚀机理研究 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2014, 36(1): 150)

[5] Zhang S F, Cao H M, Liu Y, et al. Numerical simulation of liquid-solid two-phase flow and erosion-collision in a syphon [J]. J. Hebei Univ. Technol., 2008, 37(3): 48
(张少峰, 曹会敏, 刘燕等. 弯管中液固两相流及壁面碰撞磨损的数值模拟 [J]. 河北工业大学学报, 2008, 37(3): 48)

[6] Liu J J, Lin Y Z, Tian X L, et al. Numerical simulation of flow induced corrosion of carbon steel in liquid/solid two-phase flow system [J]. J. Chem. Ind. Eng., 2004, 55(2): 231
(刘景军, 林玉珍, 田兴玲等. 碳钢在固/液两相流条件下流动腐蚀的数值模拟 [J]. 化工学报, 2004, 55(2): 231)

[7] Wang K, Li X F, Wang Y, et al. Numerical prediction of the maximum erosion location in liquid-solid two-phase flow of the elbow [J]. J. Eng. Thermophys., 2014, 35(4): 691
(王凯, 李秀峰, 王跃等. 液固两相流中固体颗粒对弯管冲蚀破坏的位置预测 [J]. 工程热物理学报, 2014, 35(4): 691)

[8] Oka Y I, Okamura K, Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation [J]. Wear, 2005, 259(1): 95

[9] Oka Y I, Yoshida T. Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage [J]. Wear, 2005, 259(1): 102

[10] DNV RP-O501. Erosive wear in piping systems [S], 2007

[11] Zhang Y, Reuterfors E P, McLaury B S, et al. Comparison of computed and measured particle velocities and erosion in water and air flows [J]. Wear, 2007, 263(1): 330

[12] Zeng L, Zhang G A, Guo X P. Erosion-corrosion at different locations of X65 carbon steel elbow [J]. Corros. Sci., 2014, 85: 318

[13] Zhang G A, Zeng L, Huang H L, et al. A study of flow accelerated corrosion at elbow of carbon steel pipeline by array electrode and computational fluid dynamics simulation [J]. Corros. Sci., 2013, 77: 334

[14] Stack M M, Abdelrahman S M. A CFD model of particle concentration effects on erosion-corrosion of Fe in aqueous conditions [J]. Wear, 2011, 273(1): 38

[15] Stack M M, Corlett N, Zhou S. A methodology for the construction of the erosion-corrosion map in aqueous environments [J]. Wear, 1997, 203: 474

[16] Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems [J]. J. Fluid Mech., 1972, 55(2): 193

[17] Ding Y G, Wang H L, Guo X P, et al. Erosion-corrosion of metals and alloys in liquid-solid phase [J]. Mater. Prot., 2001, 34(11): 16
(丁一刚, 王慧龙, 郭兴蓬等. 金属在液固两相流中的冲刷腐蚀 [J]. 材料保护, 2001, 34(11): 16)

[18] Huser A, Kvernvold O. Prediction of sand erosion in process and pipe components [A]. Proc 1st North American Conference on Multiphase Technology [C]. Banff, 1998, 31: 217

[19] Parsi M, Najmi K, Najafifard F, et al. A comprehensive review of solid particle erosion modeling for oil and gas wells and pipelines applications [J]. J. Nat. Gas Sci. Eng., 2014, 21: 850

[20] Forder A, Thew M, Harrison D. A numerical investigation of solid particle erosion experienced within oilfield control valves [J]. Wear, 1998, 216(2): 184

[21] Grant G, Tabakoff W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles [J]. J. Aircraft, 1975, 12(5): 471

[22] Lin Z, Ruan X, Zhu Z, et al. Numerical study of solid particle erosion in a cavity with different wall heights [J]. Powder Technol., 2014, 254: 150

[23] Ji S M, Ma B L, Tan D P. Numerical analysis of soft abrasive flow in structured restraint flow passage [J]. Opt. Precis. Eng., 2011, 19(9): 2092
(计时鸣, 马宝丽, 谭大鹏. 结构化表面环境下软磨粒流的流场数值分析 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2092)

[24] Du M J, Zhang Z T, Zhang C Y, et al. Analysis of erosion fracture stress of 90° elbow inmulti-phase mixed transmission pipeline [J]. Oil Gas Storage Transp., 2011, 30(6): 427
(杜明俊, 张振庭, 张朝阳等. 多相混输管道90°弯管冲蚀破坏应力分析 [J]. 油气储运, 2011, 30(6): 427)

[25] Fu L, Gao B J. Numerical simulation of the flow field and wear prediction of the elbow of coal-oil slurry transporting pipelines [J]. Chem. Eng. Mach., 2009, 36(5): 463
(付林, 高炳军. 油煤浆输送管道弯管部位流场的数值模拟与磨损预测 [J]. 化工机械, 2009, 36(5): 463)

